



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Evaluating the Destructive Effects of Salt on Asphalt Pavement and Reviewing Modern Solutions for Preventing Ice Formation and De-icing on Road and Airport Pavements.

Nemat Nawroozi^{1*}, Reza Amin², Ali Khodaii³

1* - Undergraduate student of civil Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran

2- M.Sc Civil Engineering and Transportation Planning, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran

3-Full professor, Department of Civil & Environment, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 05 April 2024; Revised: 10 May 2024; Accepted: 11 May 2024; Published: 22 August 2024

Abstract

One of the challenges in the construction of roads and airports that affects the transportation system is the freezing of the pavement surface, which can lead to accidents and cause financial and human losses. Historically, most countries around the world have used salt as a de-icing agent for pavements. While salt is effective for de-icing, it has destructive effects on both the pavement and the environment. Asphalt pavements, being a vital part of transportation infrastructure due to their importance in traffic safety and comfort, are significantly affected by the use of salt as a de-icing agent. This can lead to various types of damage, including increased degradation, cracking, and reduced lifespan of the pavements. These challenges have led to the search for new and innovative solutions for de-icing and preventing ice formation on pavements. This article examines the destructive effects of salt on asphalt pavements and evaluates and compares modern solutions for de-icing and preventing ice formation. These solutions include the use of organic materials, methods of using thermal energy for de-icing, which involves geothermal energy, non-geothermal energy, and electrical energy, as well as mechanical methods.

Keywords: Asphalt pavement, transportation system, salt, new deicing solutions, organic materials, thermal energy, geothermal energy

Cite this article as Nawroozi, N., Amin, R. and Khodaii, A. (2024). "Evaluating the Destructive Effects of Salt on Asphalt Pavement and Reviewing Modern Solutions for Preventing Ice Formation and De-icing on Road and Airport Pavements." (e195899). Civil and Project journal, 6(6), e195899 doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2024.456031.1286>

ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2024 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: nawroozinemat@gmail.com



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

ارزیابی اثرات مخرب وجود نمک روی روسازی آسفالتی و مروری بر راهکار های نوینی جلوگیری از ایجاد یخ و یخ زدایی بر روسازی راهها و فرودگاه ها

نعمت نوروزی^{۱*}، رضا امین^۲، علی خدایی^۳

۱* - دانشجویی کارشناسی مهندسی عمران ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران برنامه ریزی حمل و نقل، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۳- استاد تمام و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۷ فروردین ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۲۱ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۲۲ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ شهریور ۱۴۰۳

چکیده

یکی از مشکلاتی که در روسازی راهها و فرودگاهها گریبان گیر سیستم حمل و نقل می شود، یخ زدگی سطح روسازی و در پی آن ایجاد حادثه و رساندن خسارات مالی و جانی به مردم است. از دیرباز، اکثر کشورهای جهان از نمک به عنوان ماده یخزدا برای روسازی ها استفاده می کردند. نمک با وجود اینکه کارایی خوبی برای یخ زدایی دارد، اما اثرات مخربی بر روی روسازی و محیط زیست دارد. از آنجایی که روسازی های آسفالتی، به عنوان بخش حیاتی از زیرساخت های حمل و نقل، به دلیل اهمیتشان در ایمنی و راحتی ترافیک، از اهمیت بسزایی برخوردارند، استفاده از نمک به عنوان ماده یخزدا می تواند به طرق مختلف به روسازی های آسفالتی آسیب برساند، از جمله افزایش تخریب، شکستگی و کاهش عمر مفید آنها. این چالش ها منجر به جستجوی راهکارهای جدید و نوآورانه برای یخ زدایی و جلوگیری از ایجاد یخ بر روی روسازی می شود. در این مقاله، اثرات مخرب وجود نمک بر روسازی های آسفالتی مورد بررسی قرار می گیرد و راهکارهای نوین برای یخ زدایی و جلوگیری از ایجاد یخ بر روی روسازی ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار می گیرند. این راهکارها شامل استفاده از مواد ارگانیک، روش استفاده از انرژی گرمایی جهت یخ زدایی که شامل انرژی زمین گرمایی، انرژی غیر زمین گرمایی و انرژی الکتریکی است، و روش های مکانیکی می شود.

کلمات کلیدی: روسازی آسفالتی، سیستم حمل و نقل، نمک، راهکارهای نوین یخ زدایی، مواد ارگانیک، انرژی گرمایی، انرژی زمین گرمایی

۱-مقدمه

یکی از مشکلاتی که در روسازی راه‌های برون‌شهری و فرودگاه‌ها گریبان‌گیر سیستم حمل‌ونقل می‌شود، یخ‌زدگی سطح روسازی و در پی آن ایجاد حادثه است. برف، یخ و برفاب باعث کاهش ضریب اصطکاک بین لاستیک و سطح روسازی می‌شوند که نه تنها مانع از حمل‌ونقل مردم و کالاها می‌شوند بلکه زندگی و دارایی مردم را نیز تهدید می‌نمایند. بر علاوه، آسیب‌های جانی، آسیب‌های جبران‌ناپذیری را به بدنه روسازی در اثر سیکل‌های یخبندان ایجاد می‌کند. در برخی از شهرهای سردسیر دنیا مانند شهر کلگری در ایالت آلبرتا کانادا، سالانه بیش از ۳۰۰ سیکل یخبندان به وقوع می‌پیوندد و بیش از ۴۰۰۰۰ کیلومتر بزرگراه در این ایالت تحت خطر آسیب‌دیدگی ناشی از سیکل‌های یخبندان قرار می‌گیرند (Alberta Municipal Affairs, 2008).

با توجه به همه مشکلات ذکر شده و جلوگیری از خسارات ناشی از برف و یخبندان، نیاز شدیدی به برف‌روبی و یخ‌زدایی است. شیوه متداول و رایج در اکثر کشورهای در حال توسعه، برف‌روبی با استفاده از ماشین‌آلات راهسازی و شن‌ونمک‌پاشی به‌شیوه سنتی است. نمک‌پاشی سطوح آسفالتی و بتنی، ابتدایی‌ترین و به نظر کم‌هزینه‌ترین روش مدیریت یخبندان می‌باشد. فرآیند اصلی یخ‌زدایی به‌روش پاشش شن و نمک بدین‌شکل می‌باشد که دانه‌های شن و ماسه، اصطکاک وسایل‌نقلیه را با سطح افزایش می‌دهند و به شکستن پیوندهای یخ کمک می‌کنند. نمک نیز با جذب آب به‌صورت محلول درآمده و در میان برف و شیارهای یخ و زیر آن جریان می‌یابد و با پایین آوردن دمای انجماد در محیط، برف و یخ را ذوب می‌کند و موجب جدا شدن قطعات یخ از سطح‌جاده می‌شود و سطحی عاری از یخ را با اصطکاک بیشتر فراهم می‌کنند. در استفاده از روش‌ها و شیوه‌های سنتی، معایبی نظیر خوردگی و خستگی سطوح آسفالت و بتن، عدم توزیع یکنواخت و رانده‌شدن سریع سایشگرها (شن و ماسه)، خطر صدمه به خودروها و عابرین (به‌علت پرتاب دانه‌های شن)، مسدودشدن زهکش‌ها، ضایعات زیست‌محیطی و تحمیل هزینه‌های مضاعف پاکسازی پس از دوره یخبندان وجود دارد. همچنین استفاده از مواد شیمیایی ذوب‌کننده برف به‌خصوص نمک نیز منجر به ایجاد عوارض برخی سوء بر ساختار، کارکرد و محیط زیست می‌شود. با توجه به مشکلاتی که یخ‌زدایی به روش سنتی ایجاد می‌کند، نیاز است درباره راهکارهای نوینی که در جهان برای یخ‌زدایی ابداع شده است تحقیق صورت گیرد.

۲- روش‌های جلوگیری از یخ‌زدن روسازی

روش‌های مختلفی برای مقابله با این رخداد وجود دارد که به صورت کلی آنها به دو دسته تقسیم می‌شود.

۲-۱. روش پیشگیری از ایجاد لایه یخ و برف (Anti- Icing)

این روش با هدف جلوگیری از یخبندان در سطح روسازی انجام می‌گیرد. در این روش، به کمک داده‌های هواشناسی و همچنین اطلاعات سطح روسازی، یخبندان احتمالی معابر را پیش‌بینی می‌کنند و پیش از شروع یخ‌زدگی، اقدام به پاشیدن مواد ضدیخ می‌کنند. این مواد باعث می‌شوند که دمای نقطه انجماد آب در سطح معبر پایین بیاید و به این طریق از یخ‌زدگی آن جلوگیری شود. هدف از این عملیات، متوقف‌سازی تشکیل یا توسعه اتصال بین برف و یخ با هدف برف‌روبی آسان است. در کشورهای پیشرو نظیر آمریکا، ژاپن، فنلاند، نروژ، سوئد، دانمارک، هند و...، اولویت اول در عملیات برف‌روبی، پیشگیری از یخ‌زدگی است (Sanzo & Stephen., 2008).

عملیات ضد یخ زدگی به دو روش انجام می گیرد.

الف) روش مکانیزه^۱: در این روش، با توجه به اطلاعات هواشناسی و وضعیت سطح روسازی، قبل از بروز یخبندان و بارش برف، از ماشین های خاصی که مواد محلول را پخش می کنند، استفاده می شود. این مواد ضد یخ روی سطح جاده و مسیرهای عبور پاشیده می شوند تا از ایجاد یخبندان جلوگیری شود (Kordani, & Sadeghi 2016).

ب) روش هوشمند: در این روش، با استفاده از سیستم های هوشمند، به صورت اتوماتیک یا نیمه اتوماتیک و بر اساس اطلاعات هواشناسی و شرایط سطح روسازی، مواد ضد یخ بر روی سطوح معابر پاشیده می شود. این سیستم ها قابلیت پوشش دادن فواصل زیاد را دارند. مواد ضد یخ توسط نازل هایی که در فواصل مشخصی از یکدیگر بر روی سطح روسازی نصب شده اند، پاشیده می شوند. این روش به خصوص برای رمپ ها، لوپ ها، پل ها و معابر حساس مانند کنار گارد ریل ها مناسب است. نازل های قابل نصب بر روی دیواره های پل ها، سطح روسازی ها، عرشه پل ها و گارد ریل ها از انواع نازل های پخش کننده مواد در این روش استفاده می شوند.



شکل (۱) روش مکانیزه پخش مواد زد یخ به روی جاده (Thomas et al., 1996).

۲-۲. روش یخ زدایی (De-icing)

عملیات یخ زدایی به منظور از بین بردن توده برف و یخ تشکیل شده و موجود مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش، پس از تشکیل برف با استفاده از ماشین آلاتی نظیر برف روب، لودر، برف خور، گریدر و همچنین با استفاده از سایشگرها (نظیر شن و ماسه)، نمک استفاده می شود. سایشگرها اصطکاک سطح را افزایش داده و در پیوندهای یخ و برف نفوذ می کنند. این کار هم باعث می شود تا احتمال لغزش و انحراف وسایل نقلیه روی سطح جاده یخ زده یا پوشیده از برف کم شود و هم با افزایش درجه حرارت تحت اثر اصطکاک و ایجاد شیار و شکاف روی سطح یخ و برف موجود در جاده، سرعت ذوب شدن آن ها را افزایش می دهد. نمک نیز با جذب آب به صورت محلول درآمده و در میان برف و شیارهای یخ و زیر آن جریان می یابد و با پایین آوردن دمای انجماد در محیط، برف و یخ را ذوب می کند و موجب جدا شدن قطعات یخ از سطح جاده می شود و سطحی عاری از یخ را با اصطکاک بیشتر فراهم می کند. در اکثر کشورها سال هاست که از شن و ماسه و نمک به منظور یخ زدایی سطح جاده ها استفاده می شود، اما این روش ها خسارات و معایبی را به دنبال دارند. از جمله معایب سایشگرها می توان به ایجاد آلودگی در هوا، کثیف کردن شانه راه و انباشته شدن در کنار راه، افزایش هزینه ها در خصوص پاک سازی بعد از استفاده، ایراد آسیب های جدی به وسایل نقلیه در حال تردد و ... اشاره کرد (Sanzo & Stephen., 2008).

همچنین استفاده از نمک ها در روسازی بتنی سبب تخریب بتن و پوسته پوسته شدن بتن و در نتیجه باعث از بین رفتن لایه سطحی بتن می شود که به عوامل مهاجم مثل رطوبت، کلر، اجازه ورود به اعماق بتن را خواهد داد و باعث افزایش درجه

^۱ mechanized

اشباع بتن می شود. ورود یون کلرید باعث خوردگی آرماتور می شود در حالیکه افزایش درجه اشباع باعث کاهش مقاومت به دلیل اثر یخبندان داخلی می گردد. این دو اثر باعث کاهش عمر مفید بتن شده و در نهایت تخریب بتن را به همراه خواهند داشت. نمک در روسازی های آسفالتی نیز اثرات مخرب دارد که به آن میپردازیم.

۳- آثار مخرب نمک بروی روسازی های آسفالتی

۳-۱. نمک

نمک یک ماده طبیعی، جامد و دانه دانه است و تقریباً از اوایل قرن نوزدهم برای کنترل یخ به کار رفته است. معمولاً نمک با استفاده از دانه بندی های خاص برای کنترل برف و یخ مورد استفاده قرار می گیرد. برای نمک دو نوع دانه بندی وجود دارد؛ یکی با دانه بندی ریزتر و دیگری با درجه نرمتر. دانه بندی نرمتر اغلب در نواحی که تشکیل شبنم و یخبندان رایج است، استفاده می شوند. دانه بندی های زبرتر نیز برای ترکیب با سایر مواد استفاده می شوند. در روش سنتی یخ زدایی، از دانه بندی درشت نمک استفاده می شود تا اطمینان حاصل شود که ذرات نمک دارای اندازه مناسب و قدرت ماندگاری بیشتری می باشند. این باعث می شود تا آب نمک به اندازه کافی تولید شود و عمل ذوب برای شکستن پیوند بین برف و یخ با سطح جاده به خوبی انجام شود (Bacon, 1998).

در زمان یخ زدایی از روی سطوح آسفالتی، نمک نقش کاهش دهنده دمای انجماد آب در محیط را برعهده داشته و در نتیجه منجر به ذوب شدن برف و یخ از روی سطوح روسازی آسفالتی میشود. هر چند پاشیدن نمک روی سطح آسفالت عموماً موجب آسیب دیدگی و یا خوردگی مستقیم آن نمیشود، ولیکن نمک مورد استفاده در یخ زدایی که حالا به صورت محلولی درآمده است، هم در زمان ذوب یخ و هم در روزهای پس از آن، با وارد شدن به درزهای آسفالت و خاک و بستر، باعث آسیب های جدی به روسازی آسفالتی میگردد که در زیر به چند مورد آن اشاره میگردد (Ftikos & Parissakis, 1999).

۳-۲. اثر مخرب ورود نمک محلول با نفوذ به درزها

محلولی که در اثر اضافه کردن مواد شیمیایی به سطح پوشیده از برف و یخ جاده پدید می آید بسته به نوع ماده شیمیایی بکار رفته در محدوده دمایی بین منفی ۷ تا ۲۹ - درجه سلسیوس منجمد میشود. در شب های زمستانی دما به زیر صفر درجه سلسیوس میرسد و در ساعات مختلف شب تحت اثر جریان ترافیک، باد و تراکم ابرها نوسان میکند. در شب دمای محل برای ادامه فرآیند ذوب یخ و برف کافی نیست، لذا یخ ذوب شده و برفاب ایجاد شده در محل و نیز محلول نمکی که اکنون در حقیقت همان برفاب و آب ناشی از ذوب یخ ها است نیز یخ میزند. میدانیم که سطح آسفالت پر از درزها و ترک خوردگی های کوچک و بزرگ است و آب حتی در کوچکترین درزها هم نفوذ میکند. در حالت طبیعی که آب نزدیک به خالص است و نمک در آن حل نشده است، پس از رسیدن دما به حدود صفر درجه سلسیوس آب در درزها یخ زده و موجب انبساط آن میشود، اما چون نوسانات دما در محدوده های کمتر از دمای انجماد آب است این اتفاق در طول شب فقط یکبار رخ میدهد. در شب های بعد از عملیات زمستانی به دلیل وجود نمک محلول در آب، دمای انجماد آب کمتر از صفر درجه سلسیوس بوده و در میان بازه نوسانات دمای محیط در شب قرار میگیرد. در نتیجه آب در طول شب چندین مرتبه یخ زده و ذوب میشود. نتیجه اینکه درزها چندین مرتبه منبسط^۱ و منقبض^۲ میشوند که این امر خسارات زیادی را به رویه ی آسفالتی وارد میکند. مطالعاتی که در جاده های ایالت ویسکانسین^۳ بین سالهای ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۵ صورت گرفته است نشان داد: بسته به وضع اولیه جاده پس از دوره های متشکل از سه بار وقوع یخبندان و انجام عملیات راهداری زمستانی (پاشیدن نمک) روی سطح، میزان ترک ها و خرابی روسازی بین ۲۵ تا ۳۵۰ درصد افزایش مییابد (Flintsch Gerardo, 2000).

۳-۳. اثر مخرب نمک محلول با افزایش قطبیت خاک

نمکی که در جریان عملیات راهداری زمستانی مصرف شده است، درست از شروع ذوب شدن یخها تا وقتی که سطح کاملاً خشک شود، به صورت محلول وارد آب زیر زمینی و نیز جریان نهر یا آب زهکشی شده حل میشود. این محلول تقریباً ۸۵ تا ۹۵ درصد کل مواد نمکی موجود در عملیات را در خود دارد. وقتی نمک حل میشود به صورت یونهای آزاد در محلول در می آید و این یونها موجب افزایش قطبیت خاک به خصوص در خاکهای رسی میشوند. در مناطق مرطوب، مکانهایی که سطح آب زیر زمینی بالا باشد و محلهایی با میزان بارش زیاد، خاک قطبی رطوبت زیادی جذب میکند که در نتیجه، ۲۰ تا ۴۵ درصد تورم و افزایش حجم خاک بسته به جنس آن است. این اتفاق ممکن است در لایه نهایی خاکریزی (sab grade) یا هر یک از مصالح اساس یا زیراساس رخ دهد، که نتیجه آن وارد آمدن فشار به لایه های فوقانی و ایجاد خرابی و ترک خوردگی در لایه های مختلف روسازی و روکش آسفالتی میشود (Tehrani & Safdarian, 2015).

۳-۴. اثر مخرب نمک محلول با ایجاد سفره های سدیم

سدیم جزء عناصر سخت طبیعت میباشد که در کمبود نسبی رطوبت مولکولهای آن با هم تشکیل پیوندهایی سفره مانند میدهند. مواد شیمیایی نمکی که یونهای سدیم دارند در مناطقی با رطوبت یا بارندگی زیاد موجب تورم خاک میشوند، اما در مناطقی که رطوبت خاک نسبتاً کم است، نمکهای محلولی که وارد خاک شده اند در روزهای بعد رطوبت خود را از دست میدهند، چون کاملاً خشک نشده اند که دوباره به صورت نمک متبلور شوند و به صورت سفره های یون مثبت در کنار یکدیگر سطوحی به ابعاد چند دهم میلیمتر مربع تا حتی نزدیک به یک مترمربع را پدید می آورند. این سفره ها که کمبود الکترون دارند، جاذب آب هستند. آب باران که از بالا به پایین تراوش میکند پس از رسیدن به این سفره ها قادر به عبور و رفتن به لایه های تحتانی نخواهد بود و به این ترتیب آب در زیر لایه های روسازی جمع می شود که نتیجه آن فشار به لایه های فوقانی، تورم، سستی خاک و در نهایت ترک خوردگی روکش آسفالتی است (EPA, 1998) ، (Winglesch, 1999).

۳-۵. اثر مخرب نمک محلول با نمکی شدن خاک

در مناطق زیادی از ایران در زمستان، آب و هوای سرد و نسبتاً خشک حاکم میباشد. در این وضعیت اگر جاده از درجه اهمیت بالایی برخوردار و حجم جریان ترافیک زیاد بوده و یا شدت یخزدگی جدی باشد انجام عملیات راهداری زمستانی الزامی است. محلول نمکی استفاده شده در عملیات زمستانی وارد خاک شده اما به دلیل خشک بودن خاک سریعاً رطوبت خود را از دست داده و به شکل نمک متبلور میشود. تکرار عملیات راهداری زمستانی در طول سالیان به دلیل فقر بارندگی در محل که مانع از شسته شدن تدریجی نمک از خاک میشود، رفته رفته خاک اطراف جاده را نمکی میکند. طبق مطالعاتی که ادوارد در مناطق مرکزی ایالات متحده بین سال های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۵ انجام داده است، مشخص گردید که بسته به حجم عملیات زمستانی و میزان خشکی محل و نیز آمادگی قبلی خاک از نظر میزان نمک موجود، خاک نواحی اطراف جاده در این مناطق پس از ۳ تا ۷ سال نمکی میشود. خاک نمکی در ایام خشک سال، مقاومتی مانند خاک های عادی دارد اما در زمان بارندگی به شدت مقاومت خود را از دست میدهد. مطالعات انجام شده نشست هایی بین ۰.۵ تا ۱۰ سانتیمتر و در طول های ۰.۲ تا ۱۵ متر را در اثر نمکی شدن در طول جاده نشان داد. بدیهی است که این نشست ها باعث تخریب رویه آسفالتی میشوند (Transportation Research Board, 2007).

۴ - روش های نوین یخزدایی و جلوگیری از ایجاد یخ در روسازی

۴-۱. ترکیبات ارگانیک

پس از شناسایی مسائل و مخاطرات ناشی از استفاده از انواع نمک در راه ها و به منظور پیدا کردن ماده های که بتوان در یخزدایی از آن استفاده کرد، محققین مختلفی تلاش هایی انجام دادند. الینور در سال ۱۹۹۲ با بررسی عناصر موجود در جدول تناوبی، لیست عناصری با قابلیت یخزدایی که خاصیت خوردگی، سمی و رادیواکتیو ندارند را شناسایی کرد. در نهایت به این نتیجه رسید که عناصر هیدروژن، کربن، نیتروژن، سدیم، منیزیم، پتاسیم، کلسیم، فسفر و ترکیباتی شامل این عناصر از ویژگی های مطلوب برخوردارند. سپس با تولید ترکیب های مختلف و استفاده از آن به عنوان ماده یخزدا، ماده ی متانول^۱ و CMA^۲ را به عنوان ماده مناسب یخزدا شناسایی کرد. البته در مطالعات بعدی به دلیل خاصیت اشتعال متانول و فرار بودن آن از سطح روسازی، این ماده نیز حذف شد و عملاً CMA به عنوان ماده ای مناسب بدون مشکلات خوردگی و زیست محیطی مشخص شد (Fay et al., 2008).

CMA از واکنش آهک دولومیتی با استیک اسید به وجود آمده و دمای ذوب آن -۲۲ درجه سانتیگراد میباشد. برای رسیدن به کارایی همانند نمک در یخزدایی باید مقدار بیشتری از این ماده (حدود ۲ برابر) استفاده کرد و با توجه به تراکم کمتر آن نسبت به نمک و قیمت بیشتر آن، هزینه خرید و نگهداری این ماده بیشتر میباشد. با این وجود بدلیل عدم آسیب رساندن به روسازی و همچنین عدم آلودگی زیست محیطی، ماده ی مناسبی برای ذوب یخ میباشد. در حال حاضر در مناطق سردسیر آمریکا استفاده از این ماده به عنوان ماده یخزدا موثر رواج زیادی دارد (Fay et al., 2008).

از دیگر مواد ارگانیک که در این زمینه استفاده میشود میتوان پتاسیم استیک^۴، فرمیت پتاسیم^۵، فرمیت سدیم^۶، فرمیت کلسیم^۷ و اوره^۸ را نام برد. پتاسیم استیک با نقطه انجماد (-۶۲) درجه سانتیگراد و قابلیت انحلال در آب و الکل در مناطق خیلی سرد کاربرد بهتری دارد. به طور کلی بدلیل اینکه مواد ارگانیک مانند نمک ها خاصیت خوردگی روسازی و تجهیزات را ندارند، در فرودگاه ها بسیار استفاده میشوند. (Fay et al., 2008).

۴-۲. استفاده از انرژی گرمایی

از جمله روش های جدید در ممانعت از یخ زدن معابر، گرم کردن سطح آنها قبل از رسیدن به دمای زیر صفر درجه است. این روش مشکلات استفاده از مواد شیمیایی یخ زدا و ضد یخ را نداشته و با تبدیل انرژی الکتریکی به گرمایی، مانع از یخ زدن راه میشود. با توجه به ماهیت انرژی حرارتی به دسته های متعددی تقسیم میشود. این روش ها از حرارت زمین گرمایی^۹، الکتریسیته، مادون قرمز و خورشید استفاده می کنند. (Yu et al, 2014)

۴-۲-۱. روش حرارتی زمین گرمایی (Geothermal heat systems)

سیستم های گرمایش زمین گرمایی یکی از روش های موثر برای یخزدایی جاده ها می باشند. این سیستم ها از گرمای طبیعی زمین، که اغلب در عمق زمین قابل دسترسی است، برای ذوب کردن برف و یخ استفاده می کنند. برخلاف روش های مبتنی بر سوخت های فسیلی، سیستم های گرمایش زمین گرمایی به عنوان یک منبع انرژی پایدار شناخته می شوند.

^۱ Mathanol
^۲ Calcium Magnesium Acetate
^۳ Acetic acid
^۴ Potassium acetate

^۵ Potassium formate
^۶ Sodium formate
^۷ Calcium formate
^۸ Urea
^۹ geothermy

استفاده از سیستم‌های گرمایش زمین گرمایی برای یخزدایی جاده‌ها می‌تواند به کاهش هزینه‌ها، افزایش ایمنی رانندگان، و کاهش مشکلات مرتبط با برف و یخ بر روی جاده‌ها کمک کند.

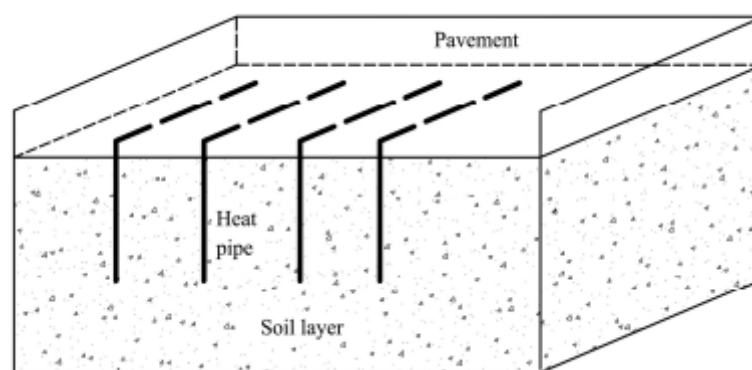
انرژی حرارتی زمین گرمایی شامل گرما در خاک کم‌عمق، آب گرم ژئوترمال^۱ و بخار است. که در زمین تولید میشود و در همانجا ذخیره میگردد، منبع پیدایش این انرژی تفاوت دمایی بین هسته و پوسته است که گرما از سمت هسته به سمت پوسته جریان پیدا میکند و باعث ایجاد گرما در پوسته زمین میشود. که از این انرژی میتوان برای یخزدایی روسازی ها ، گرمایش مساکن و تولید انرژی برقی استفاده کرد . سیستم‌های گرمایش زمین گرمایی نسبتاً متداول در اروپا، آمریکا، ژاپن، آرژانتین و کانادا هستند،(Yu et al, 2014)

زمین گرمایی برای یخزدایی جاده‌ها به دو روش مختلف می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد ۱- لوله‌های گرمایشی (Heat pipes)، ۲- سیال زمین گرمایی (Geothermal fluid) .

۴-۲-۱. لوله‌های گرمایشی (Heat pipes)

در این روش انرژی زمین گرمایی در خاک های کم عمق را میتوان توسط شبکه‌ی از لوله‌های ضدیخ به روسازی منتقل کرد. (شکل ۲)، شبکه‌ی از لوله‌ها در نواحی کم عمق زمین که انرژی زمین گرمایی وجود دارد قرار داده شده و با گردش سیال داخل لوله‌ها و انتقال آن به لوله‌های که در روسازی جاسازی شده سطح روسازی را گرم میکند و به وسیله‌ی این کار دمایی روسازی به بالای ۰ درجه سانتیگراد گراد می‌رسد. این روش برای اولین بار در شهر تورنتون ایالت نیو جرسی^۳ آمریکا در سال ۱۹۶۹ استفاده شد. در این آزمایش لوله‌ها به عمق ۵ سانتی‌متر زیر روسازی و فاصله ۶۰ سانتی‌متری بین لوله‌های عمودی تعبیه شدند. در زمستان، دمای عمقی ۲ متری بین ۸٫۸ درجه و ۱۳٫۸ درجه سانتیگراد متغیر بود و دمای سیال متحرک در لوله‌ها در طی طوفان‌های برفی بین ۴٫۴ درجه و ۱۱٫۱ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. نرخ معمول ذوب برف اندازه‌گیری شده ۰٫۶۰ تا ۱٫۲۵ سانتی‌متر در ساعت بودند و دمای هوا متناظر در محدوده (۶٫۷-) تا ۱٫۷ درجه سانتی‌گراد بود (Lund, ۲۰۰۰).

دو آزمایش طراحی دقیق‌تر لوله‌های گرمایشی در سال‌های ۱۹۷۶ و ۱۹۸۰ به ترتیب در دره سیبیل^۴ و در پل Chunxi در یونان انجام شد. سیستم‌های مشابه لوله‌های گرمایشی در ژاپن و در Glenwood Springs، کلرادو نیز آزمایش شدند. سیستم لوله‌های گرمایشی Glenwood Springs از آب زیرزمینی به جای منبع ژئوترمال استفاده کرد.



شکل (۲) شماتیک یک روسازی که توسط لوله های حرارتی زمین گرمایی گرم می شود (Yu et al, 2014).

^۱ geothermal
^۲ Trenton

^۳ New Jersey
^۴ Sybille

۴-۲-۱. سیال زمین گرمایی (Geothermal fluid)

این روش آب گرم و بخار زیرزمینی را به روسازی یا سطح روسازی برای ذوب برف و یخ منتقل می کند. معمولاً به دو صورت کار گرفته میشود ۱- سیال را مستقیم به رویی روسازی جهت یخزدایی میپاشد. ۲- شبکه از لوله های که سیال زمین گرمایی در آن جریان دارد در زیر روسازی قرار داده میشود تا یخ و برف قرار گرفته بالای روسازی را ذوب کند. در شهر فوکوی ژاپن سطوح معابر را با آب گرم زیرزمینی میپاشیدند تا یخ و برف سطح جاده ها را از این طریق از بین ببرد. آب زیرزمینی با دمای ۱۵ درجه سانتی گراد از طریق کانال های مدفون در پیاده رو ها به جای مورد نظر انتقال داده میشد و در اثر این انتقال دما به ۷,۲ درجه سانتی گراد کاهش می یافتند و این آب را در سطح جاده میپاشید تا برفی روی جاده ذوب شود. پس از ذوب برف روی سنگفرش، آب پاشیده شده روی جاده. ممکن باعث نشست لایه های روسازی شود، بنابراین نیاز است تا این آب دوباره جمع آوری شود. همچنین، این آب در دمای پایین ممکن یخ بزند و باعث ایجاد مشکلات دیگر شود. بنابراین شهر فوکوی پس از سال ۱۹۹۰ شروع به استفاده از سایر سیستم های گرمایش حرارتی کرد. در ساپورو^۲، ژاپن، از آب گرم زیرزمینی برای ذوب برف در جاده ها از سال ۱۹۶۶ استفاده می شود. در ساخت اولیه از لوله های فولادی استفاده می شد، اما در سال ۱۹۷۳ با لوله های پلی بوتن^۳ جایگزین شدند. دمای ورودی آب گرم در محدوده ۷۶ درجه سانتی گراد تا ۸۱ درجه سانتی گراد بود (Yu et al, 2014).

سیستم ذوب برف روسازی فعلی در جاده Gaia در Ninohe^۱، ژاپن شامل سه مبدل حرارتی با قطر ۸۹ میلی متر، ۱۵۰,۲ متر طول و یک سیستم پمپ حرارتی با یک موتور ۱۵ کیلوواتی و دو پمپ گردش ۰,۷۵ کیلوواتی است. لوله های حرارتی پلی بوتیلن با قطر ۱۶ میلی متر در ۱۰ سانتی متر زیر سطح روسازی بتنی آسفالتی با فاصله ۲۰ سانتی متری بین لوله ها قرار می گیرند. توان حرارتی کل ۵۰ کیلو وات است. پس از سال ها کارکرد، ثابت شده است که این سیستم ۲۰ درصد قدرت کمتر از سیستم گرمایشی برقی استفاده می کن. (Yu et al, 2014).

از سال ۲۰۰۵، بیش از ۲۵ سیستم ذوب برف روسازی زمین گرمایی دیگر در پارکینگ ها، رمپ های بزرگراه ها و پیاده روها در ژاپن نصب شده است. (Yu et al, 2014)

در (Copenhue-Caviahue) آرژانتین از بخار زمین گرمایی برای گرم کردن خیابان ها و جاده ای که متصل به ویلای کوپاهوئه^۴ و یک ایستگاه اسکی استفاده میشود (Pesce, 1998). بخار از یک چاه زمین گرمایی با عمق ۱۴۰۰ متر تولید می شود. و این بخار از طریق یک خط لوله به طول ۲,۶ کیلومتر به سنگفرش در شهر انتقال داده می شود. دمای زمستان در این منطقه به ۱۲- درجه سانتی گراد می رسد. سرعت باد می تواند به ۱۶۰ کیلومتر در ساعت برسد و میانگین ضخامت بارش برف ۳۲,۵ سانتی متر است. با استفاده از گرمای زمین گرمایی، دمای روسازی را می توان بین ۱۲,۲ تا ۱۶,۱ درجه سانتی گراد نگه داشت.

منابع زمین گرمایی در ایسلند فراوان است. تا سال ۲۰۰۰، سیستم های ذوب جاده در مساحتی بیش از ۳۵۰۰۰۰ متر مربع نصب شده بود و نسبت کاربرد آب ژئوترمال حدود ۳۳ درصد بود (Yu et al, 2014).

۴-۲-۲. سیستم های گرمایش غیر زمین گرمایی (Non-geothermal heating systems)

سیستم های گرمایش غیرزمین گرمایی به روش هایی اطلاق می شود که از منابع گرمایی غیرزمین گرمایی مانند گاز طبیعی، نفت، یا سوخت های دیگر برای تأمین گرما استفاده می کنند. سیستم های گرمایش غیرزمین گرمایی برای یخزدایی روسازی به عنوان یک روش مؤثر و پیشرفته شناخته می شوند. این سیستم ها همانند سیال زمین گرمایی معمولاً با استفاده از دو روش اصلی، یعنی گرمایش تحت فشار و سیستم های تبادل حرارتی زیرسطحی، برای حل مشکل برف و یخ روی سطح راهرو استفاده می شوند.

^۱ Fukui
^۲ Sapporo

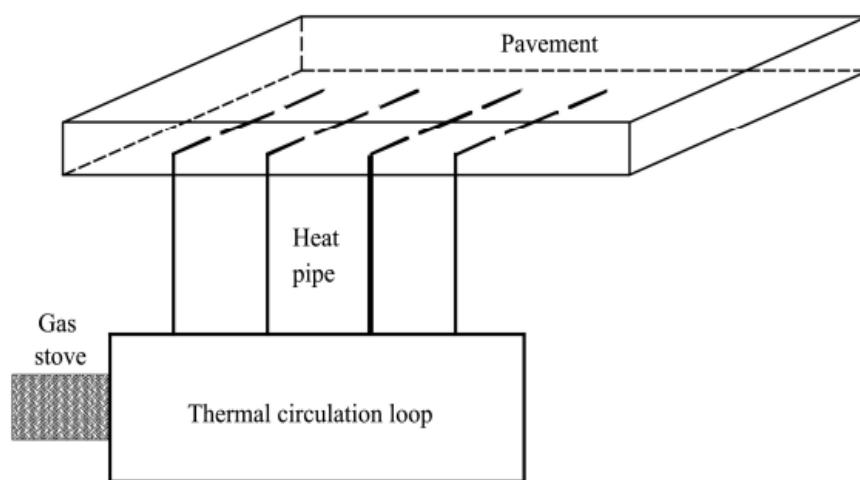
^۳ polybutene polybutene
^۴ Copahue

۱. گرمای تحت فشار یا پاشیدن سیال گرم به روی روسازی : در این روش، آب گرم یا سیال گرمایی دیگر از طریق لوله‌های حرارتی به سطح راهرو پخش می‌شود. این گرمایش سطحی باعث ذوب شدن برف و یخ روی جاده می‌شود.

۲. سیستم‌های تبادل حرارتی زیرسطحی: در این روش، لوله‌های حرارتی زیر سطح راهرو قرار می‌گیرند. سیال گرمایی از طریق این لوله‌ها عبور می‌کند و گرمای خود را به سطح جاده منتقل می‌کند. این سیستم‌ها از تکنولوژی پیچیده‌تری استفاده می‌کنند اما معمولاً کارایی بالاتری در ذوب کردن برف و یخ دارند.

با استفاده از این سیستم‌ها، می‌توان هزینه‌های نگهداری جاده را کاهش داد، ایمنی رانندگان را افزایش داد، و مشکلات احتمالی ناشی از یخ زدایی را کاهش داد. معایب آن‌ها می‌تواند شامل اعتماد به منابع سوخت‌های آلاینده، وابستگی به قیمت‌های انرژی، و مشکلات مربوط به تهویه مطبوع در برخی مناطق باشد.

وزارت حمل و نقل ویرجینیا^۱ یک پل حرارتی در شهر ستان آمهرست^۲ ساخته است که در آن پروپان^۳ سوخته می‌شود تا مخلوطی از آنتی‌فریز پروپیلن گلیکول^۴ و آب را گرم کند. در این سیستم حرارت در پایین لوله‌ها انتقال پیدا می‌کند و سپس گرما توسط لوله‌ها به سطح پل منتقل می‌کند (شکل ۲). لوله‌ها در ابتدا با فریون^۵ پر شده بودند، اما خروجی حرارت ناکافی بود. در سال ۱۹۹۹، این سیستم به آمونیاک^۶ تبدیل شد. طول پل حدود ۳۵ متر و عرض آن ۱۳ متر است. این پروژه شامل تقریباً ۳٫۲ کیلومتر لوله‌کشی فولادی، شامل ۲۴۱ شمع حرارتی است. سیستم گرمایشی با هزینه ۱۸۱۵۰۰ دلار آمریکا ساخته شده است و حدود ۲۷٫۳ درصد از پروژه از فاضلاب شهری در گرمایش روسازی استفاده می‌کند. (Yu et al, 2014).



شکل (۳) شماتیک یک پل که توسط یک سیستم غیرزمین گرمایی گرم می‌شود (Yu et al, 2014).

لیو و ژو (۲۰۰۵) مزایای اقتصادی و زیست محیطی تکنیک‌های ذوب برف ذخیره حرارتی خاک خورشیدی را تجزیه و تحلیل کردند و این رویکرد را توصیه کردند. وانگ و همکاران (۲۰۰۷) یک تجزیه و تحلیل عددی از ویژگی‌های انتقال حرارت یک سیستم ذوب برف جاده گرمایی خورشیدی- زمین گرمایی انجام داد، یک مدل از انتقال حرارت روسازی یک سیستم ذوب برف جاده ایجاد کرد، و شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت ناپایدار را انجام داد. بر اساس داده‌های آب و هوای ساعتی یک سال معمولی و شرایط مرزی ترکیبی. اثرات مختلف بر عملکرد ذوب برف جاده در اعماق مختلف لوله‌ها و دماهای گرمایش تجزیه و تحلیل شد و روابط بین حداکثر بار گرمایی، بارش برف، دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد استخراج شد.

^۱ Virginia
^۲ Amherst
^۳ propane

^۴ propylene glycol
^۵ Freon
^۶ Ammonia

مشکلات اصلی پیش بینی شده با این سیستم، اطمینان از آب بندی تمام اتصالات و محافظت از لوله ها در برابر خوردگی بود. هزینه های ساخت و ساز به دلیل حفاری و حفاری مورد نیاز برای دفن لوله ها ممکن افزایش یابد.

۴-۲-۳. سیستم های حرارتی الکتریکی (Electric heat systems)

سیستم های حرارتی الکتریکی از برق در کابل ها یا مواد رسانای روسازی برای گرم کردن روسازی استفاده می کنند. اساس کار در این روش این است که کابل های انتقال حرارت به صورت زیگزاگی در میان لایه های روسازی جاسازی شده و باعث گرم شدن لایه ها میشود (Lei et al, 2006) و یا جریان برق به مواد رسانای که قبلاً در ترکیب روسازی قرار گرفته وصل میشود و این امر باعث بالا بردن دمای روسازی میشود. این روش در شمال اروپا نسبتاً بالغ است و حتی برخی از شرکت ها در زمینه طراحی، نصب و خدمات پس از فروش حرفه ای این سیستم ها فعالیت می کنند. ایالات متحده اولین کشوری بود که از کابل برق برای گرم کردن روسازی استفاده کرد. کتابچه راهنمای طراحی انجمن مهندسين گرمایش، تبريد و تهويه مطبوع آمریکا (ASHRAE) طراحی، توزیع کابل، اتصال خط و آزمایش های نصب را مشخص می کند (ASHRAE, 1985).

در سال ۲۰۱۷ بای و همکاران پژوهشی در مورد بتن رسانا حاوی الیاف فولادی انجام دادند. این روش یکی از روش های نوین پیشگیری از یخ زدن روسازی است. در این روش با تبدیل انرژی الکتریکی به گرمایی، از طرفی مانع از یخ زدن راه شده و از طرفی مشکلات استفاده از مواد شیمیایی را ندارد. به منظور رساندن جریان الکتریکی و انتقال آن در سطح روسازی آسفالتی و بتنی، در هنگام ساخت در این روسازی ها از الیاف رسانا استفاده میشود. این الیاف برا تقویت مقاومت کشی روسازی هم مفید بوده و در مواقع لزوم با انتقال جریان الکتریکی به سرتاسر راه، سبب بالا رفتن دمای روسازی تا بیش از ۶۰ درجه می گردد.

در این روش برای تولید انرژی الکتریکی، بهتر است از انرژی های تجدیدپذیر استفاده شود. همچنین برای کم بودن هزینه انتقال انرژی باید روندی طراحی شود تا به کمترین تجهیزات انتقال انرژی نیاز باشد. در سال های اخیر، محققین مختلفی در زمینه استفاده از انرژی های تجدید پذیر مطالعاتی به انجام رساندند. یکی از این انرژی ها انرژی خورشیدی می باشد. این انرژی در این مورد هم استفاده شده و سبب ساخت سیستم جاده خورشیدی برای جلوگیری از یخزدگی روسازی شده است. در این سیستم مجموعه ای پانل های خورشیدی در سطح جاده و یا کنار آن تعبیه شده است تا انرژی خورشیدی در طول تابستان و یا روزهای آفتابی جمع آوری و ذخیره کند. سپس در روزهایی که هوا سرد است با انتقال حرارت به سطح روسازی، مانع از افت دمای روسازی به زیر صفر درجه و تشکیل یخ می شود (Nasir et al, 2017).

Guan و همکارانش. در سال (۲۰۰۳) گفتند که یک راه دیگر برای ذوب برف تغییر نقطه انجماد مواد روسازی است. افزودن مواد ضد یخ زدگی به بتن آسفالتی می تواند تا حدی از خود روسازی در برابر یخ زدگی محافظت کند و ضریب اصطکاک روسازی ها را در مناطق سردسیر افزایش دهد. ژانگ و سان (۲۰۱۰) دو رویکرد متفاوت را توصیف کردند: (۱) روش شیمیایی، که در آن یک ماده شیمیایی ضد یخ به مواد روسازی اضافه می شود تا نقطه انجماد روسازی کاهش یابد. این ماده شیمیایی را می توان از طریق موپینگی حل کرد. از آنجایی که مواد ضد یخ در داخل روسازی هستند، می توانند به طور مداوم آزاد شوند، حتی اگر روسازی به طور مداوم ساییده شود. بنابراین، مواد با کیفیت خوب بیش از شش سال عمر دارند. و (۲) روش فیزیکی، که در آن یک ماده الاستیک به مواد روسازی اضافه می شود تا وضعیت تماس بین روسازی و تاپرهای خودرو را تغییر دهد و رفتار تغییر شکل روسازی را تغییر دهد. به دلیل ظرفیت تغییر شکل بالاتر، تنش تطبیقی روسازی تحت نیروی خارجی می تواند یخی یخ زده را بشکند و آن را ذوب کند. این روش از تغییر شکل روسازی برای رسیدن به هدف نهایی بهره می برد، اما در بارش های سنگین برف ایده آل نیست.

۴-۳. برفروبی به روش مکانیکی

با تجهیزات پیشرفته برف روبی یا پاکسازی برف به روش مکانیکی شامل برداشتن برف از سطح راه برای تسهیل رفت و آمد است. برف روبی مسیرها معمولاً توسط اشخاص در محل زندگی خود یا توسط نهادهای دولتی و اداره کننده شهر صورت میگیرد. افراد معمولاً پس از بارش برف سنگین شروع به پارو کردن برف در مسیرهای پیاده و سواره می کنند. شیوه متداول و رایج نهادهای دولتی در اکثر کشورهای در حال توسعه، برفروبی با استفاده از ماشین آلات راهسازی (گریدر، بابکت، ماشین شن پاش) می باشد. روش استفاده از ماشین آلات راه سازی همانند روش سنتی از معایبی برخوردار است که عبارتند از آسیب به آسفالت در اثر وزن زیاد ماشین آلات، کاهش اصطکاک و لغزندگی بیشتر معابر در اثر صیقل داده شدن سطح توسط تیغه های برف روب، آلودگی زیست محیطی به دلیل مصرف سوخت های فسیلی و هزینه زیاد مربوط به تامین سوخت و همچنین نگهداری ماشین آلات برفروبی. لذا امروزه شرکت های سازنده تجهیزات برف روبی در حال توسعه ماشین آلات خود جهت کاهش معایب و افزایش کارایی اینگونه تجهیزات می باشند. در ذیل برخی از ماشین آلات مدرن مورد استفاده در کشورهای پیشرفته که برای برف روبی و ایمن سازی و امکان عبور و مرور مردم استفاده میگردند اشاره شده است (Staples, et al 2004).

۴-۳-۱. اورآسن آر اس ۲۰۰ (OVERAASEN RS ۲۰۰)

این ماشین یک ماشین فوقالعاده قدرتمند و سریع در برفروبی جاده ها است. این ماشین به طور هوشمندانه ای قابلیت اضافه نموده تجهیزات جانبی را داشته تا برای برفروبی جاده های پرترافیک با برف سنگین به کار گرفته شود. استفاده از پوشش فایبرگالس با فناوری پیشرفته این ماشین را به خوبی آیرودینامیک نموده است. این ماشین با ویژگی هایی همچون برس غولپیکر، فن ظرفیت بالا و تنظیمات خودکار برفروبی به ماشینی با کاربری آسان تبدیل شده که هزینه ها را نیز به مراتب پایین آورده است.

۴-۳-۲. اشمیت سوپرا (SCHMIDT SUPRA)

این ماشین برای برفروبی مناطق بزرگ با حجم سنگینی از برف طراحی شده است. این ماشین هوشمند به سیستم هدایت دقیق مجهز شده تا بهترین بهره وری را داشته باشد. "سوپرا" دارای برف روب های معکوس است که از شفت اصلی نیرو محرکه خود را تامین مینماید. مخزن سوخت این ماشین قدرتمند ظرفیت بالایی داشته و بنابراین آن را قادر میسازد تا ۸ ساعت به طور مستمر برف روبی کند و برف ها را تا فاصله 30 متری پرتاب کند. همچنین این ماشین مصرف سوخت بهینه و آلودگی صوتی بسیار کمی داشته و کابین داخلی آن ضد صدا است.

۴-۳-۳. پرینورث (PRINOTH SW4S)

این ماشین یک ماشین فوقالعاده برای برف روبی پیاده روها و مسیرهای باریک است. از این ماشین در سطح شهر و برای مسیرهای باریک استفاده میشود. این ماشین پس از برف روبی برای اطمینان از آب شدن یخ های موجود در لایه های زیرین برف توسط مخزنی که در پشت ماشین تعبیه شده اقدام به پاشش نمک می نماید.

۴-۳-۴. امدوتو پلوز (PLOW MDOTTOW)

این ماشین غول پیکر بواسطه داشتن حسگرهای الکترونیکی در برفروبی که در پشت آن تعبیه شده به سرعت و با دقت قابل توجهی قابلیت برفروبی از دو مسیر موازی را بصورت همزمان دارد. برف روب پشتی این ماشین قابلیت تشخیص خودروهای ایستاده در کنار جاده را دارد تا در اثر راندن برف به کنار مسیر آسیبی به این خودروها وارد نگردد.

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

از آنجایی که یخزدایی و برف‌روبی یک نیاز اساسی برای جلوگیری از خسارات ناشی از تصادفات به دلیل تراکم برف و یخ در جاده‌ها است، و همچنان یخزدایی برای افزایش طول عمر روسازی می‌تواند مؤثر باشد. اما طریقه یخزدایی و اینکه از چه روشی برای یخزدایی استفاده کنیم نیز حایز اهمیت است. روش‌های سنتی و قدیمی یخزدایی، علاوه بر اینکه مفید می‌توانند باشند، ممکن است خسارات جبران‌ناپذیری را در روسازی و محیط زیست ایجاد کنند. بنابراین، با توجه به مطالعات انجام‌شده در این مقاله، اثرات مخرب نمک بالای روسازی‌های آسفالتی را بررسی کرده‌ایم. نمک که سال‌هاست به عنوان ماده یخزدای استفاده می‌شود، با ایجاد سفره‌های سدیمی، افزایش قطبیت خاک، نفوذ در درزهای روسازی و افزایش آن در خاک روسازی، باعث تخریب روسازی‌های آسفالتی در درازمدت می‌شود.

بنابراین، با توجه به ضررهایی که روش‌های یخزدایی به شیوه سنتی، به‌ویژه نمک، دارند، ضروری است که روش‌ها و راهکارهای جدید و نوین که در کشورهای پیشرفته برای یخزدایی و برف‌روبی استفاده می‌شود را با دقت مورد بررسی قرار دهیم. در این مقاله، اکثر روش‌های نوین یخزدایی مورد بررسی قرار گرفته است که با توجه به مزایای آنها و شرایط محیطی، اقتصادی و فنی، می‌توان آنها را به عنوان جایگزینی برای روش‌های سنتی معرفی کرد.

هرچند انتخاب شیوه یخزدایی وابسته به شرایط محیطی، اقتصادی، فنی و زیست محیطی می‌باشد ولی پیشنهادات زیر جهت جایگزین بهتر برای شیوه های سنتی در نظر گرفته شود.

۱. استفاده از مواد ارگانیک به خصوص CMA می‌تواند برای یخزدایی روسازی‌ها به خصوص فرودگاه‌ها مفید واقع شود، هرچند که رسیدن به کارایی همانند نمک در یخزدایی باید مقدار بیشتری از این ماده (حدود ۲ برابر) استفاده کرد و با توجه به تراکم کمتر آن نسبت به نمک و قیمت بیشتر آن، هزینه‌ی خرید و نگهداری این ماده بیشتر می‌باشد. ولی با توجه به اینکه تمامی خسارات سنگینی که یخزدایی سنتی با استفاده از شن و نمک در حین عملیات یخزدایی و پس از آن به روسازی، خاک، هوا، تاسیسات جانبی راه‌ها و خودروها و محیط‌زیست، وارد می‌آورد، می‌تواند استفاده از CMA برای یخزدایی مقرون به صرفه باشد.
۲. استفاده از انرژی زمین گرمایی جهت یخزدایی در مناطق که انرژی زمین گرمایی به فراوانی یافت می‌شود می‌تواند مفید باشد، هرچند که از لحاظ اقتصادی، فنی و زیست محیطی باید مورد بررسی قرار گیرد.
۳. استفاده از سیستم حرارتی الکتریکی برای یخزدایی با توجه به اینکه انرژی الکتریکی آن توسط منابع تجدیدپذیر، به خصوص خورشید تامین شود می‌تواند جایگزین مناسبی برای یخزدایی به شیوه های سنتی باشد.
۴. با توجه به پیشرفت های چشم گیر که در راستای تولید ماشین آلات مکانیکی جهت برف‌روبی و جلوگیری از ایجاد یخ و برف صورت گرفته است، می‌توان از آنها برای جلوگیری از ایجاد یخ و برف استفاده کرد، مانند ماشین آلات همچون اوراسن آراس، اشمیت سوپرا، پرینورث و امدوتو پلوز که با توجه به شرایط محیطی و حجم برف هرکدام آنها ویژگی های خاص خود را دارد.

در پایان یک بار دیگر تاکید می‌گردد که با تحقیق و بررسی و بر اساس نوع و اهمیت روسازی، صرفه اقتصادی، اقلیم منطقه، نوعیت بارش و همراه و همگام با آخرین متد، باید نسبت به انتخاب بهترین شیوه و میزان استفاده از مواد مورد استفاده یخزدایی اقدام نمود.

Alberta Municipal Affairs, Government of Alberta "Building envelope survey. In partnership with the City of Calgary" Accessed online on September 2014 at http://municipalaffairs.gov.ab.ca/documents/ss/0_630_BuildingEnvelopeReport-Apr08.pdf, 2008.

Sanzo, D., and Stephen J. Hecnar. (۲۰۰۶). Effects of road de-icing salt (NaCl) on larval wood frogs (*Rana sylvatica*). *Environmental Pollution* ۱۴۰, no. ۲,

Kordani, A Abdi.,& Sadeghi, S Saleh. (2016). "Impact of deicing materials on airport pavement winter maintenance management", 4th international congress of structure, architecture and urban development. Tehran. <https://civilica.com/doc/617993>.

Bacon R., (1998), "Deicing Chemical Use on the Michigan State", Michigan Department of Transportation

Ftikos, C., Parissakis. G., (1999), "The Combined Action of Mg²⁺ and Cl⁻ Ions in Asphalt Paste", Road and Asphalt Research, Vol. 15, No. 4, pp. 593-599.

Flintsch Gerardo W., (2000), "Assessment of the performance of several roadway mixes under rain, snow and winter maintenance activities", Report No. VTRC 04-CR18. Wisconsin Transportation Research.

11-EPA, U. S., (1998), "Environmental Impact of Highway Deicing", Water Quality Office, Edison, New Jersey, 11040 GKK 06/71. Council. Charlottesville, VA.

12-Winglesch, K., (1999), "Road Salt and Groundwater, Is It a Healthy Combination?", On Tap, Volume 4, Issue 2.

3-Transportation Research Board, (2007), "Deicing Chemicals and Snow Control on Soil and Water", Transportation Research Record 1157.

Fay, L., Volkening, K., Gallaway, C., & Shi, X. (2008, January). "Performance and impacts of current deicing and anti-icing products: User perspective versus experimental data. In Proc., 87th Annual Meeting of Transportation Research Board (pp. 08-1382). Washington, DC: Transportation Research Board.

Tehrani, A. & Safdarian, S Sharif. (2015). Destructive effects of using the method of spraying salt and sand mixture on all types of pavements for de-icing and investigating new de-icing methods at the airport and other roads. The third international science and engineering conference.

Yu WB, Yi X, Guo M, et al., 2014. State of the art and practice of pavement anti-icing and de-icing techniques. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 6(1).

Lund WJ, 2000. Pavement Snow Melting. *GHC Bulletin*, pp. 12–19. Nydahl J, Pell K, Lee R, 1997. Evaluation of an earth heated bridge deck. U.S. DOT Contact No. DTFH61-80-C-00053. University of Wyoming, Laramie, WY, U.S.

Pesce AH, 1998. Direct uses of geothermal energy in Argentina. *Geothermal Resources Council Transactions*, 22: 269–273.

Liu YQ, Zhu Q, 2005. Analysis of economics and environment of snow melting by using solar-soil energy. *Construction Science and Technology*, 17: 98–99.

Wang HJ, Zhao J, Chen ZH, et al., 2007. Numerical study on heat-transfer behavior of the pavement in road snow-melting system with solar and geothermal energy. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 6: 608–611

Lai, J., Qiu, J., Chen, J., Fan, H., & Weng, K. (2015). New Technology and Experimental Study on Snow-Melting Heated Pavement System in Tunnel Portal. "Advances in Materials Science and Engineering", Volume, Article ID 706536, 11 pages.

American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), 1985. ASHRAE Handbook: Fundamentals. ASHRAE, Atlanta, GA, pp. 20–25.

Bai, Y.-h., Chen, W., Chen, B., & Tu, R. (2017). Research on Electrically Conductive Concrete with Double-Layered Stainless Steel Fibers for Pavement Deicing. "ACI Materials Journal", 144(6).

Nasir, D. S., Hughes, B. R., & Calautit, J. K. (2017). Influence of urban form on the performance of road pavement solar collector system: Symmetrical and asymmetrical heights. *Energy Conversion and Management.

Guan MH, Xu YG, Lu TJ, et al., 2003. Application of microwave heating on removing ice on streets. Journal of Northern Jiao-tong University, 4: 79–83.

Zhang HG, Sun W, 2010. Way to limit the freezing point of pavement in snow ice area. Communications Science and Technology Heilongjiang, 12: 94–96.

Staples, J. M., Gamradt, L., Stein, O., Shi, X. (2004). Recommendations for winter traction materials management on roadways adjacent to bodies of water. Publication No. FHWA/MT-04-008/8117-19A Final Report Prepared for the Montana Department of Transportation, Helena, MT.

Thomas, S. K., Cassoni, R. P., & MacArthur, C. D. (1996). Aircraft anti-icing and de-icing techniques and modeling. *Journal of Aircraft*, 33(5), 841-854